

2020年度「エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究集会」報告

荒木 健太郎*¹・志田 純哉*²・近藤 誠*³・藤倉 理人*⁴
 南 孝太郎*⁵・稲垣 実央*⁶・山下 克也*⁷
 佐藤 陽祐*⁸・當房 豊*⁹

1. はじめに

「とりあえず顔を合わせて気軽に意見交換できる場が必要だ」

標題の研究集会は、世話人らのそんな立ち話から始まった雲物理コミュニティによる気軽な意見交換の場として、2016年2月に開催した「エアロゾル-雲相互作用について語らう会」を経て、翌2017年2月の「エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究集会」に発展し(荒木ほか 2017)、今回で6年目の開催となる。

エアロゾル・雲・降水の相互作用がもたらす気候への影響は、気候予測に関する大きな不確実性要因のひとつであり、その科学的な理解を深めることが求められる。しかし、エアロゾル、雲、降水を扱う研究は、雲粒ひとつひとつの振る舞いを対象とするマイクロなものから、積乱雲などの降水システムを扱うメソスケールのもの、気候変動のような大きな時空間スケールを

対象とする研究まで多岐にわたっている。近年では、北極域を対象としたエアロゾル・雲とその相互作用に関する研究が進展するなど、エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究の重要性が増してきている。このエアロゾル・雲・降水の相互作用を対象とした研究を行う研究者が一堂に会して最新の知見を共有することを目的とし、「2020年度エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究集会」を2021年2月16日～17日に開催した (<https://www.mri-jma.go.jp/Dep/typ/araki/202102cloudstudy.html>, 2021.3.18閲覧)。

本研究集会はこれまで国立極地研究所で開催していたが、新型コロナウイルス感染拡大の影響で、初めてのオンライン開催となった。今回は学生23名を含む75名が参加、26件の研究発表(うち総説2件)が行われ、活発な意見交換がなされた(第1図)。本報告では各講演の概要と、各セッションを通して得られた共通理解や今後の期待を紹介する。

(荒木健太郎)

*1 (連絡責任著者) Kentaro ARAKI, 気象研究所, 研究集会世話人.

araki@mri-jma.go.jp

*2 Junya SHIDA, 東京大学大気海洋研究所.

*3 Makoto KONDO, 北海道大学.

*4 Masato FUJIKURA, 筑波大学.

*5 Kotaro MINAMI, 筑波大学.

*6 Mio INAGAKI, 兵庫県立大学.

*7 Katsuya YAMASHITA, 防災科学技術研究所雪氷防災研究センター, 研究集会世話人.

*8 Yousuke SATO, 北海道大学大学院理学研究院, 研究集会世話人.

*9 Yutaka TOBO, 国立極地研究所, 研究集会世話人.

© 2021 日本気象学会



第1図 研究集会参加者の集合写真.

2. エアロゾル・雲・降水粒子の観測

1日目最初のセッションでは粒子をテーマの軸として、降雪粒子の測定と併合、及びエアロゾル粒子の測定と生成過程に関する研究の発表があった。

勝山祐太（森林総研）は、可搬型で安価なディストロメーターの開発（Katsuyama and Inatsu 2021）について発表した。開発した装置の性能は、「粒径は0.5~13mmまで計測可能」「落下速度は5mm以上で過小評価」「落下速度の測定精度に関係なく粒径分布を計測可能」である。今後この装置が普及することにより、雲物理において重要な降水粒子の空間粒子濃度や粒径分布といったデータが広く集められるようになることが期待される。

山下克也（防災科研）は、北陸地方などで利用されている既存の散水消雪システムに使われている降雪センサーに通信装置を取り付け、降雪分布を広く取得できるシステムの開発（Yamashita *et al.* 2020）に関して発表した。開発したシステムでは、絶対値は劣るが既存の地上観測網では検出しにくい狭い降雪域（約10kmスケール）を検出できることを示した。

藤倉理人（筑波大）は、降雪粒子の衝突時の併合について発表した。防災科研（長岡市）に設置された動画撮影装置や気象観測システムのデータを解析し、気温が高いほど併合の確率も高くなる傾向があること、気温だけでなく粒子のタイプや粒径、衝突時の重なり具合といった他の要素も衝突結果に関係してくることを示した。また、それらの中で気温と粒径が特に強く結果に影響を与えることも示した。

茂木信宏（東大）は、エアロゾル粒子の屈折率、粒径分布、形状などを自動測定するための複素散乱振幅測定手法を用いた装置の開発に関して発表した。開発済みの既存（Moteki 2020）の装置を改良することにより、インライン測定で少なくとも0.2~5.0 μm のサイズのエアロゾル粒子を測定できるようになったことを示した。開発次第で雲粒子や氷晶粒子の計測もできる可能性もあり、発表後は測定装置の利用可能性や需要などに関して議論が行われた。

服部祥平（東工大）は、硫酸の三酸素同位体組成に基づくケミカルフィードバック機構の要因解明研究に関する発表を行った。ケミカルフィードバック機構とは、1970年代以降のSO₂の排出規制にも関わらず、大気エアロゾル及びその主要無機成分である硫酸エアロゾル濃度の減少が鈍化する機構のことである。この機構の要因解明に向け、アイスコア中の硫酸の三酸素同

位体組成から大気硫酸エアロゾルの生成過程の変遷を復元したことを示した（Hattori *et al.* 2021）。

前半2つの降雪に関する研究は自分の得意分野と近く、今後研究を進めるにあたって貴重な情報や発想が得られた。また、後半2つのエアロゾル粒子に関する発表からは雲物理学の持つ懐の深さ、他分野への接点を知ることができ、前半とは違った意味で研究会というイベントの重要性に触れられた。

（藤倉理人）

3. CCN・INPの観測と降水影響

1日目後半のセッションでは、東京スカイツリーでの雲・CCN・INPの観測研究が2件、つくばでのCCN・INPの観測研究が2件、CCN活性の表現のための数値研究が1件、INPと豪雨イベントに関する数値研究1件が発表された。

三隅良平（防災科研）は、東京スカイツリーでの雲粒スペクトロメータとCCN計による観測の結果とパーセルモデルシミュレーションから、東京の下層雲におけるCCNと雲粒の関係を報告した。解析結果から、東京の下層雲は、Reutter *et al.* (2009) の分類における「Transitional」レジームに属することが示され、本研究からCCNの個数濃度と上昇流の双方が雲粒数濃度に影響することが示された。

當房 豊（極地研）は、東京スカイツリーでの通年観測の結果から、東京におけるINPの季節変動と黄砂イベントや気象場との関連を解析した結果（Tobo *et al.* 2020）を報告した。気温-20°C以上でも活性を示すINP数濃度は季節変動を示し、-20°C以下で活性を示すINP数濃度は顕著な季節変動を示さないという結果を示した。しかし、黄砂イベント時には、-20°C以下でもINP数濃度の大幅な上昇がみられ、ダスト粒子が影響を与えている可能性を示唆した。

郭威鎮（気象研）は、Yamashita *et al.* (2011) で用いられたCCN計との相互比較用のパーセルモデルを用いて、CCN計では困難だった大きな吸湿性粒子の吸湿度を推定することを試みた。モデルシミュレーションによる雲粒の粒径分布と中央値は、CCN計チャンバー内の半径に関する水過飽和度の依存性を考慮して、CCN計の結果に近づくことを示した。今後、モデルシミュレーションによって、サブミクロンサイズの吸湿性フレアー粒子の吸湿度を推定できるようになることが期待される。

田尻拓也（気象研）は、内部混合したエアロゾルの

CCN・INP 活性の定式化のため、エアロゾルの吸湿性パラメータ、エアロゾル単位表面積当たりの INAS の濃度の気温依存性との関係に着目し、地上観測と室内実験の結果を報告した。ローカルダスト事例の吸湿度の結果から、粒子が外部（もしくは内部）混合を示唆する結果となり、黄砂事例では、粒子の吸湿性が低く、また、INAS 濃度がイライトやアリゾナテストダストなどのダスト標準試料と同程度であったことが分かり、事例ごとの CCN・INP 活性に関する特徴が明らかになった。

折笠成宏（気象研）は、過去6年間のつくばでのエアロゾルの地上観測から CCN・INP の季節変動とその要因 (Orikasa *et al.* 2020) について報告した。CCN 濃度が冬季に高くなる要因として、逆転層高度がより低いことを考察した。INP に関しては、INP 数濃度と POPC を用いて判別されたダスト粒子との関連は顕著ではない結果であった。その結果を踏まえ、現在はつくばにおいて有効な INP の特定を行っていることが報告された。

南 孝太郎（筑波大）は、平成30年7月豪雨を対象に、NHM の氷晶核形成速度を増減させた結果、降水や雲微物理に与える影響を報告した。昇華凝結核・凝結凍結核モードを促進させることで、モデルの中で霰の生成が促進され、高度4~6 km の霰の増加と、降水強度の強い雨の増加につながることを示した。内部凍結核モードでは、モデルの水平解像度の違いによって雲微物理と降水の応答が変化することを示した。

本セッションでは CCN や INP に関する観測研究とモデル研究両面からのアプローチがなされた。非線形性が高い雲物理という分野で、観測とモデル双方の共通理解が進み、今後より正確な CCN・INP のパラメタリゼーションの開発とそれがモデルへ実装されることの実現を期待したい。

（南 孝太郎）

4. 雲微物理過程の詳細モデルの評価

2日目最初のセッションでは5件の講演が行われ、雲の数値計算のモデル間比較や、雲微物理の素過程に関するモデルの改良、粒子ベースモデルの改良についての報告があった。

島 伸一郎（兵庫県立大）からは、2021年8月に開催される International Cloud Modeling Workshop (ICMW) 2021 (<https://iccp2020.tropmet.res.in/Cloud-Modeling-Workshop-2020>, 2021.3.18閲覧) に

向けて進められている、孤立雄大積雲を対象としたモデル間比較プロジェクト (Model Intercomparison Project: MIP, <https://s-shima-lab.sakura.ne.jp/en/projects/icmw2021-congestus>, 2021.3.18閲覧) の途中経過報告があった。この MIP では、どちらも詳細な雲微物理モデルとして知られるビンモデルと粒子ベースモデルの比較に焦点が当てられている。今回示された結果はモデル間で概ね一致していたものの、雲粒粒径分布の幅の広がりなどに関する系統的な差も確認されたこと、この差違は、ビンモデルと粒子ベースモデルの数値解法としての特徴の違いに起因するものであると考えられること、今後より詳しい解析と、降水特性や計算コストの比較を進めていく予定であることが報告された。

殷神之（兵庫県立大）は、超水滴法 (Shima *et al.* 2009) と 2 モーメントバルク法とを用いて霧雨を伴う海洋層積雲を対象とした MIP (The second Dynamics and Chemistry of Marine Stratocumulus field study, Research Flight 02, Ackermann *et al.* (2009)) の設定を用いて数値計算を行い、モデル間の比較を行った結果と超水滴法を使った場合の数値収束性について考察した結果について発表を行った。発表では超水滴法の結果とバルク法の結果はいずれも MIP の結果とよく一致したことで、格子幅が雲の割合や鉛直積算雲水量 (LWP) に及ぼす影響を調べたところ、超水滴法と 2 モーメントバルク法とで水平分解能と鉛直分解能への依存性が逆の傾向を示したことを報告した。同時に、これらはいずれもまだ予備的な結果であり、引き続きより詳しい解析を行っていく予定であることも報告した。

稲垣実央（兵庫県立大）は、混相雲用の超水滴法 (Shima *et al.* 2020) で使用する氷粒子の昇華成長モデルの改良に関する発表を行った。氷粒子の落下速度モデルの改良や、より正確な水蒸気拡散係数の利用、通風効果の再考などを行って改良したモデルのほうが室内実験の結果をよりよく再現することが確認されたことを報告した。また、積乱雲の2次元理想実験を行い、モデルの改良が積乱雲全体の計算に及ぼす影響を評価し、改良により降水量が条件によって数割程度増加することも報告した。さらに今後3次元でも改良を反映させた実験を行う計画があることを報告した。

齋藤 泉（名工大）は格子幅以下のスケールの過飽和度の揺らぎによる雲粒粒径分布の広がり効果を取り入れるエディ・ホッピングモデルに関する発表を

行った。エディ・ホッピングモデルは、超水滴法などの粒子法に基づく雲モデルへの実装を想定されている。発表ではエディ・ホッピングモデルを解析解に基づいて修正する方法と簡略化する方法が提案された。このモデル単純化により属性を1つ減らすことができ、粒子ベースのモデルでは計算効率的に有益であることが示された。

佐藤陽祐(北大)は、気象雷モデルを用いた数値実験によって、平成29年九州北部豪雨と平成30年西日本豪雨の雷特性の違いの原因を調査した結果について発表を行った。数値実験の結果から雷の頻度の違いは、平成30年西日本豪雨のほうが平成29年九州北部豪雨に比べ、固相の水物質が下層に偏っているため、電荷分離が起りにくく、上層の正の電荷が蓄積されないことが原因であるという報告を行った。同時に、気象雷モデルの検証を行い、降水分布のずれや、側面境界の影響を受けた領域では雷の再現性は下がるが、雲が観測を再現できれば雷モデルは再現性が高いことも報告した。

本セッションでは素過程の改良によるモデルの精緻化についての報告があった。それぞれ最新の数値計算モデルの紹介が複数あり、どの発表に対しても活発な議論が行われた。これらの議論が現実をよく表現した数値計算の開発や今後の予測性能の向上の研究のさらなる展開に繋がることを期待したい。

(稲垣実央)

5. 衛星観測と雲・降水の気象影響

2日目2つ目のセッションでは雲の衛星観測の重要性及びその発展に関する総説および衛星観測のリトリブ精度の評価、衛星観測を用いた Jumping Cirrus の解析といった衛星観測に関連する発表がなされ、さらには数値実験を用いた台風での降水強化メカニズムの解析、アンサンブル予報の太陽光発電量予測への活用検討について発表がなされた。

中島 孝(東海大)は総説として衛星観測による雲特性研究の重要性と、その歴史および近年の研究の発展について解説した。衛星観測は全球を均質に観測できるため雲特性の放射収支に与える影響やモデルの再現性を評価するのに適している。また、衛星観測から第一原理に立脚したアルゴリズムで雲微物理量が推定され、近年ではイメージャと雲レーダーを組み合わせることで雲の成長過程が推定された。さらにこれからの雲のデータ同化への活用や、EarthCARE や ACCP

などの新しい衛星観測計画があることが紹介された。

王敏睿(東海大)は数値実験を用いた Earth CARE/MSI での smile effect が雲微物理量のリトリブ精度に与える影響の解析結果を報告した。Smile effect は MSI の特定の帯域において感度関数の波長領域が見込み角によって徐々にシフトしてしまう現象である。ESA から提供された感度関数の測定値から Nakajima-King ダイアグラム (Nakajima and King 1990) を用いて smile effect によって生じるリトリブ誤差が推定され、雲頂高度が 1~2 km の場合の推定誤差は 5% 程度で軽微だが、熱赤外帯では光学的厚さの推定に最大 9.8% の誤差が生じることが示された。

山口智子(防衛大)は Jumping Cirrus (JC) を気象衛星ひまわり 8 号で観測し、雲微物理量の推定結果を報告した。衛星可視画像から JC の幅・長さ・持続時間を、赤外画像の輝度温度から JC のジャンプ高を計測し、JC の形態的特徴を明らかにした。また、観測された反射率からレイトレーシング法を用いて雲粒の有効半径と個数密度を推定した。更に、Wang (2003) との比較から JC の雲粒の昇華によって下部成層圏へ輸送される水の量を推定した。

荒木健太郎(気象研)は数値実験を用いた令和元年台風第19号での降水強化メカニズムの解析結果を報告した。地形編集を行った数値実験から地形の影響を雲微物理過程から解析した。その結果、記録的大雨の主要因として従来から示されてきた台風接近に伴う多量の水蒸気供給の持続と、地形による持ち上げによる強雨の持続に加えて、台風の温低化の過程で強化・維持された前線面で生じた水雲でも Seeder-Feeder メカニズムを通した降水強化があったことが示された。

大竹秀明(産総研)は太陽光発電出力予測に向けたメソアンサンブル予報データの日射量の評価と予測誤差の解析結果を報告した。メンバーの日射量の区間幅に実数値が含まれている滞在率は月毎に異なり、初期値が更新されるほど滞在率が低下し、概ね 50~70% 前後で補正等が必要であることが示された。また、誤差の要因がアンサンブルの初期条件が降水に注視した初期摂動であると考えられ、日射予測を考慮した摂動が誤差を軽減する可能性があることが示唆された。

このセッションでは、衛星観測に関する総説により、数値実験や室内実験の研究者の衛星観測研究への理解が深まったと考えられる。また、質疑応答では雲のデータ同化のエアロゾル観測への活用や、JC と成層圏への水蒸気輸送の関連性など発表内容と近隣分野の

課題との繋がりが見られ、異なる分野間の交流の必要性が改めて確認できた。

(近藤 誠)

6. エアロゾル・雲・降水の解析

最後のセッションでは下層雲に関する研究の総説を始めとして、エアロゾルによる寿命効果、雲微物理スキームの比較、ドローンを利用した観測方法、局地的大雨と風の関連性といったエアロゾル・雲・降水に関わる様々な分野の発表が行われた。

川合秀明(気象研)は総説として、海上の下層雲や雲パラメタリゼーションについて解説を行った(Kawai and Shige 2020)。海上の下層雲の種類や形成といった概要の説明をした後、温暖化実験において、下層雲の変化が気候モデルごとに異なることにより、気温上昇値が気候モデル間で異なることを解説した。最後に、パラメタリゼーションについて説明し、気候モデルにおける雲パラメタリゼーションの重要性について説明を行った。

志田純哉(東大大気海洋研)は気象場や湿性沈着がエアロゾルの雲寿命効果に与える影響について報告した。全球雲解像モデル NICAM (Satoh *et al.* 2014) を用いて、エアロゾル寿命効果の指標となる、エアロゾルと LWP の相関を解析した。その結果、NICAM で衛星観測と整合的に再現される負相関 (Sato *et al.* 2018) は、湿性沈着の影響を受けていることを示すとともに、NICAM は湿性沈着を過大評価している可能性を指摘した。これらの結果は、湿性沈着と寿命効果を分離することの重要性を示している。

堀田陽香(東大大気海洋研)は NICAM の雲微物理スキームの違いが雲・エアロゾル相互作用に与える影響について報告した。2 モーメントバルクスキーム (Seiki and Nakajima 2014) では 1 モーメントバルクスキーム (Tomita 2008) よりもエアロゾルと LWP の間に見られる正相関が弱いことを示し、前者では滞在時間の長い小さな霧雨が多く作られることによって雲粒の捕捉が強く働き、寿命効果が抑制されることが原因であると解釈した。また、このメカニズムにとって重要な雨滴粒径をいずれの雲微物理スキームも衛星観測に比べて過小評価している傾向を指摘した。

板羽昌之 (e ロボティクス) は気象観測装置を搭載した複数のドローンを隊列飛行させることで気象情報を計測するカイトシステムについて報告した。複数のドローンを空中に停止させた定点観測により、3次元

の情報をリアルタイムで計測することが可能であることを説明した。また、洋上風力発電の風況調査に活用することで建設コスト削減につなげるといったカイトシステムの応用例について紹介した。

後藤悠介(東京学芸大)は局地的大雨の水平方向の挙動と高層風との関連性について観測データに基づいた解析結果を報告した。最大降雨域の水平挙動は高層風の向きに対して右側にずれており、高度と共にずれは大きくなることを示した。また、風が高度と共に反時計回りに変化することから、寒気移流による成層不安定のため局地的大雨が発生しやすくなるという説を提案した。

本セッションの前半3件では全球を対象にした研究とそれに関する議論がなされた。また、後半2件ではドローン観測や地上観測といったローカルなスケールでの研究とそれに関する議論がなされた。ここでの議論が様々なスケールにおけるエアロゾル・降水・雲研究の発展につながることを期待したい。

(志田純哉)

7. まとめ

今回で6年目となる本研究集会では、実験・観測・シミュレーションと、多岐に渡るアプローチでエアロゾル・雲・降水に関係する研究発表がなされ、学生参加者も含めて非常に活発な意見交換が行われた。

講演件数・参加者数の推移をみると、2016年度:18件・約30名、2017年度:20件・34名(学生11名)、2018年度:22件・34名(学生8名)、2019年度:26件・45名(学生22名)であった。今回の講演26件・参加者74名(学生22名)は、エアロゾル・雲・降水に関連する研究コミュニティが拡大してきたことに加え、オンライン化で全国からの参加が容易になった状況を反映している。また、年々学生参加者が増えており、今回は学生による研究発表が7件と過去最多であった。これまでの研究会に参加してきた学生が卒業後も研究者として参加している例もあり、若手の育成ができる土壤ができつつあるといえる。今回も一昨年と昨年に続いて学生による自己紹介セッションを2日目午前中に設けたが、対面ではないために学生同士の交流がしにくかった。そこで、学生の交流を促進するために、承諾の得られた学生参加者については学生間で連絡先を交換するなどの工夫をした。さらに、本稿は学生参加者に各セッションの概要等の執筆を依頼し、世話人とやりとりしながらまとめた。今後の研究会でも学生参

加者や様々な年代の研究者が気軽に意見交換をできる場を提供していきたい。

また、本研究集会では総説として中島氏に衛星観測による雲特性研究について、川合氏に海上の下層雲と気候モデルにおけるパラメタリゼーション研究についてのレビュー講演を行っていただいた。多岐に渡る分野の研究者・学生の集まるなかでの総説は非常に有意義であり、勉強会的な側面でもうまく機能していたと考えられる。

本研究集会での議論や、本研究集会の発端となった雲物理コミュニティのメーリングリスト (cloud_microphysics@googlegroups.com:ML) を契機に、共同研究に発展している例も複数ある。例えば、当房が報告したスカイツリーの観測事例 (本稿3章) は、三隅が行った東京スカイツリーの観測に関するMLでの情報共有がきっかけとなった。今回も近隣分野の研究発表も多くあり、今後もエアロゾル・雲・降水に関する研究の議論の活性化やコラボレーションの促進をしやすい場としてのコミュニティ運営をしていきたい。上記MLに参加を希望される方は荒木まで連絡をいただければ幸いである。

今後もこのような研究会を継続し、エアロゾル・雲・降水に関連する研究に取り組む機運が高まり続けることを願うばかりである。最後に本研究集会は国立極地研究所・研究会制度の支援を受けて開催された。開催にあたって協力していただいた関係者の方々にこの場を借りて御礼申し上げる。

(荒木健太郎)

略語一覧

ACCP : Aerosol, Clouds, Convection and Precipitation
エアロゾル・雲・対流・降水
CCN : Cloud Condensation Nuclei 雲凝結核
EarthCARE : Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer 雲エアロゾル放射ミッション
ESA : European Space Agency 欧州宇宙機関
ICMW : International Cloud Modeling Workshop 国際雲モデリングワークショップ
INAS : Ice Nucleation Active Site 氷晶核形成活性部位
INP : Ice Nucleating Particle 氷晶核
JAXA : Japan Aerospace Exploration Agency 宇宙航空研究開発機構
JC : Jumping Cirrus Cloud ジャンピングシーラス (積乱雲の頂上から飛び出た雲)
LWP : Liquid Water Path 鉛直積算雲水量

MIP : Model Intercomparison Project モデル比較プロジェクト
MSI : Multi-Spectral Imager 多波長イメージャ
NHM : Non-Hydrostatic Model 非静力学モデル
NICAM : Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model 非静力学正二十面体格子大気モデル
POPC : Polarization Optical Particle Counter 偏光光散乱式粒子計数器

参考文献

- Ackerman, A. S., M. C. VanZanten, B. Stevens, V. Savic-Jovicic, C. S. Bretherton, A. Chlond, J.-C. Golaz, H. Jiang, M. Khairoutdinov, S. K. Krueger, D. C. Lewellen, A. Lock, C.-H. Moeng, K. Nakamura, M. D. Petters, J. R. Snider, S. Weinbrecht and M. Zulauf, 2009: Large-eddy simulations of a drizzling, stratocumulus-topped marine boundary layer. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 1083-1110.
- 荒木健太郎ほか, 2017: 「エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究集会」報告. *天気*, **64**, 483-491.
- Hattori, S., Y. Iizuka, B. Alexander, S. Ishino, K. Fujita, S. Zhai, T. Sherwen, N. Oshima, R. Uemura, A. Yamada, N. Suzuki, S. Matoba, A. Tsuruta, J. Savarino and N. Yoshida, 2021: Isotopic evidence for acidity-driven enhancement of sulfate formation after SO₂ emission control. *Sci. Adv.*, **7**, eabd4610, doi:10.1126/sciadv.abd4610.
- Katsuyama, Y. and M. Inatsu, 2021: Advantage of volume scanning video eisrometer in solid-precipitation observation. *SOLA*, **17**, 35-40.
- Kawai, H. and S. Shige, 2020: Marine low clouds and their parameterization in climate models. *J. Meteor. Soc. Japan*, **98**, 1097-1127.
- Moteki, N., 2020: Capabilities and limitations of the single-particle extinction and scattering method for estimating the complex refractive index and size-distribution of spherical and non-spherical submicron particles. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, **243**, 106811, doi:10.1016/j.jqsrt.2019.106811.
- Nakajima, T. and M. D. King, 1990: Determination of the optical thickness and effective particle radius of clouds from reflected solar radiation measurements. Part I: theory. *J. Atmos. Sci.*, **47**, 1878-1893, doi:10.1175/1520-0469(1990)047<1878:DOTOTA>2.0.CO;2.
- Orikasa, N., A. Saito, K. Yamashita, T. Tajiri, Y. Zaizen, T.-H. Kuo, W.-C. Kuo and M. Murakami, 2020: Seasonal variations of atmospheric aerosol particles focused on cloud condensation nuclei and ice nucleating particles from ground-based observations in Tsukuba, Japan.

- SOLA, 16, 212-219.
- Reutter, P., H. Su, J. Trentmann, M. Simmel, D. Rose, S. S. Gunthe, H. Wernli, M. O. Andreae and U. Pöschl, 2009: Aerosol- and updraft-limited regimes of cloud droplet formation: influence of particle number, size and hygroscopicity on the activation of cloud condensation nuclei (CCN). *Atmos. Chem. Phys.*, **9**, 7067-7080, doi:10.5194/acp-9-7067-2009.
- Sato, Y. *et al.*, 2018: Aerosol effects on cloud water amounts were successfully simulated by a global cloud-system resolving model. *Nature Commun.*, **9**, 1-7.
- Satoh, M. *et al.*, 2014: The non-hydrostatic icosahedral atmospheric model: description and development. *Prog. Earth Planet. Sci.*, **1**, 18.
- Seiki, T. and T. Nakajima, 2014: Aerosol effects of the condensation process on a convective cloud simulation. *J. Atmos. Sci.*, **71**, 833-853.
- Shima, S., K. Kusano, A. Kawano, T. Sugiyama and S. Kawahara, 2009: The super-droplet method for the numerical simulation of clouds and precipitation: a particle-based and probabilistic microphysics model coupled with a non-hydrostatic model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **135**: 1307-1320, doi:10.1002/qj.441.
- Shima, S., Y. Sato, A. Hashimoto and R. Misumi 2020: Predicting the morphology of ice particles in deep convection using the super-droplet method: development and evaluation of SCALE-SDM 0.2.5-2.2.0, -2.2.1, and -2.2.2. *Geosci. Model Dev.*, **13**, 4107-4157, doi:10.5194/gmd-13-4107-2020.
- Tobo, Y., J. Uetake, H. Matsui, N. Moteki, Y. Uji, Y. Iwamoto, K. Miura and R. Misumi, 2020: Seasonal trends of atmospheric ice nucleating particles over Tokyo. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **125**, e2020JD033658, doi:10.1029/2020JD033658.
- Tomita, H., 2008: New microphysical schemes with five and six categories by diagnostic generation of cloud ice. *J. Meteor. Soc. Japan*, **86**, 121-142.
- Wang, P. K., 2003: Moisture plumes above thunderstorm anvils and their contributions to cross-tropopause transport of water vapor in midlatitudes. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **108**, 4194, doi:10.1029/2002JD002581.
- Yamashita, K., M. Murakami, A. Hashimoto and T. Tajiri, 2011: CCN ability of Asian mineral dust particles and their effects on cloud droplet formation. *J. Meteor. Soc. Japan*, **89**, 581-587, doi:10.2151/jmsj.2011-512.
- Yamashita, K., S. Yamaguchi, T. Saito, Y. Yamakura, E. Kanda, S. Nakai and H. Motoyoshi, 2020: Quantitative snowfall distribution acquisition system with high spatiotemporal resolution using existing snowfall sensors. SOLA, **16**, 271-276.